УДК 621.373.826

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ CuBr+Ne+H_2(HBr)–ЛАЗЕРА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ НАКАЧКИ

Д.В. Шиянов, Г.С. Евтушенко, В.Б. Суханов

Томский политехнический университет
E-mail: ime@tpu.ru
Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск
E-mail: qel@asd.iao.ru

Проведен анализ температурного режима лазера на парах бромида меди, использующего активные добавки водорода (HBr) при изменении параметров накачки. Показано, что введение оптимальной добавки увеличивает температуру стенки газоразрядной трубки с 620 до 720 °С. Увеличение температуры стенки на 50...60 °С может происходить при изменении давления буферного газа с 3,3 до 13,3 кПа, а также при изменении рабочей емкости в два раза. Установлено, что введение добавки повышает давление паров рабочего вещества в активной среде лазера среднего диаметра на 6,7 Па за счет взаимодействия брома, бромводорода с атомами меди, осевшими на стенке трубки. Рассмотрены особенности теплового режима лазера при высоких частотах следования импульсов (до 100 кГц).

Введение

Среди известных на сегодняшний день нескольких модификаций лазеров на парах меди наиболее широкое применение в науке и технике получили лазеры на парах чистой меди (ЛПМ) и лазеры на парах бромида меди (ЛПБМ). Это обусловлено возможностью работы активных элементов этих источников излучения в отпаянном режиме [1–3].

Несмотря на то, что срок службы ЛПМ превышает срок службы ЛПБМ [3], последние в настоящее время привлекают все больше внимания. В первую очередь это связано с тем, что принцип создания паров рабочего вещества в такой системе позволяет снизить температуру газоразрядной трубки (ГРТ) по сравнению с ЛПМ почти втрое [4]. Это значительно упрощает конструкцию активного элемента и снижает требования по накачке, что ведет к уменьшению габаритов источника питания. Все это отражается на стоимости прибора в целом. Во-вторых, по своим характеристикам ЛПБМ не уступают ЛПМ, а по КПД даже превосходят их [5]. Они также могут работать при более высоких частотах следования импульсов (ЧСИ) генерации [6], что очень актуально для некоторых приложений.

Однако рабочий режим ЛПБМ имеет некоторые особенности. В основном это связано с тем, что приходится контролировать не только температуру рабочего канала, но и контейнеров с парами CuBr. Разность этих температур существенно зависит от условий накачки. Изменение параметров накачки приводит к изменению температуры стенки ГРТ, которая влияет на температуру контейнеров с CuBr, следовательно, и на выходные характеристики лазера.

В последнее время для увеличения энергетических характеристик ЛПБМ активно используют добавки H_2, HBr [5–7]. Введение такой примеси в активную среду лазера изменяет согласование ГРТ с генератором накачки, что также отражается на указанной разности температур. Эти добавки, как нами было предположено ранее [8], могут приводить к дополнительному образованию рабочего вещества, которое оказывает заметное влияние на мощность излучения в узких ГРТ.

Все эти проблемы требуют более детального рассмотрения. Данная работа направлена на изучение теплового режима CuBr-лазера, изменения концентрации рабочего вещества при переходе к высоким ЧСИ при различном давлении буферного газа. Также ставилась задача выяснения влияния активных примесей H_2, HBr на энерговклад в ГРТ и на давление CuBr в ЛПБМ с варьируемой концентрацией примеси с целью подтверждения предположения о дополнительной наработке рабочего вещества.

Техника эксперимента

Исследование теплового режима работы CuBr-лазера проводилось с кварцевыми ГРТ диаметром 1,6; 2,6; 3,8 см и длиной 36; 76; 96 см соответственно. Подобные конструкции приведены нами в [7]. Первая ГРТ представляла собой элемент с независимым нагревом контейнеров-отростков с CuBr, а остальные являлись саморазогревными, когда необходимое давление паров рабочего вещества в активной зоне поддерживается энергией, выделяемой разрядом. Последние две трубки предусматривали соединение с дифференциальным манометром для измерения давления CuBr и добавок H_2, HBr. В качестве буферного газа использовался Ne. Все трубки были оснащены генераторами HBr. Насыщение ГРТ водородом производилось из баллона через магистраль.

Возбуждение лазера осуществлялось по прямой схеме разряда рабочей емкости на ГРТ через коммутатор-тиратрон ТГИ1-1000/25. На частотах свыше 25 кГц использовался таситрон ТГУ1-1000/25. Температура стенки ($T_{ст}$) ГРТ контролировалась хромель-алюмелевой термопарой. Мощность излучения лазера измерялась измерителем мощности ИМО-2.

Методика измерения давления паров CuBr в зависимости от давления Ne с добавкой и без добавки HBr заключалась в следующем. ГРТ нагревалась до рабочей температуры при определенном давлении буферного газа. Показания манометра выставлялись на «0», после чего начинали разогревать контейнеры с CuBr. Оптимальная концентрация

паров CuBr определялась по максимуму мощности излучения. В другом случае во время разогрева ГРТ вводилась добавка HBr, причем $T_{ст}$ ГРТ поддерживалась на том же уровне. Затем аналогичным образом происходило измерение давления паров CuBr. Эта же методика позволяла определить давление рабочего вещества при изменении ЧСИ. В данном случае для сохранения $T_{ст}$ при увеличении ЧСИ приходилось увеличивать мощность, потребляемую от выпрямителя ($P_{потр}$).

Во время измерения мощности генерации и $T_{ст}$ при различных концентрациях водорода закачка необходимого количества H_2 каждый раз производилась в холодную ГРТ, и каждый раз $P_{потр}$ устанавливалась на заданном рабочем значении.

Необходимо отметить, что, говоря о давлении паров рабочего вещества, мы понимаем ту долю давления, на которую увеличилось общее давление газа в ГРТ при нагревании контейнеров с CuBr, иначе говоря, давление продуктов диссоциации CuBr в разряде и их дальнейшего взаимодействия с бромом, водородом и т.д.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Опыт работы с ГРТ ЛПБМ с независимым нагревом контейнеров-отростков с CuBr показывает, что выделяемая в импульсно-периодическом разряде энергия вносит свой вклад в разогрев контейнеров. Ранее в [9] отмечалось, что температура контейнеров становится на 25...70 °С меньше при отключении разряда.

Нередко, особенно в лабораторных условиях, требуется изменить выходные характеристики лазера. Проще всего это достигается за счет изменения $P_{потр}$. В этом случае, чтобы избежать перегрева или переохлаждения активной среды мы должны поддерживать разность температур, обеспечиваемой разрядом с одной стороны (в рабочем температурном диапазоне ГРТ) и печью контейнера с другой.

В саморазогревных конструкциях изменение $T_{ст}$ ГРТ ведет к изменению температуры контейнеров с CuBr. Для поддержания ее на прежнем уровне приходится изменять толщину теплоизолятора. Это создает определенные неудобства в обслуживании лазера. Один из вариантов решения этой проблемы в саморазогревных лазерах предлагался нами ранее [10] и заключался в использовании теплового кожуха со стабилизацией температуры внутри него.

Очевидно, что изменение выходных характеристик может происходить не только за счет прямого варьирования напряжения и тока питания, но и за счет других параметров, тесно связанных с ними, например: рабочей емкости, ЧСИ.

Так, работая на ЧСИ 100 кГц с рабочей емкостью 170 пФ, ГРТ диаметром 2,6 см потребляла 2232 Вт (напряжение – 6,2 кВ, ток – 360 мА). Это соответствует $T_{ст}$ – 650 °С. Заменив емкость на другую – 340 пФ, мы обеспечили приблизительно ту же $P_{потр}$ при напряжении 4,5 кВ и токе 500 мА. За счет снижения потерь в коммутаторе $T_{ст}$ повысилась до 700 °С.

Известно также, что при возрастании давления буферного газа увеличивается активное сопротивление ГРТ и улучшается ее согласование с генератором накачки. На примере ГРТ диаметром 3,8 см можно проследить, как меняется $T_{ст}$ ГРТ при изменении давления Ne. При давлении Ne 2,7 кПа и частоте 18 кГц $P_{потр}$ составляла 2520 Вт, а $T_{ст}$=640 °С. Увеличив давление до 13,3 кПа, $T_{ст}$ при той же мощности, отбираемой от выпрямителя, повысилась до 700 °С. Для поддержания ее на прежнем уровне, пришлось снизить $P_{потр}$ почти на 300 Вт.

Эти примеры показывают, что для сохранения необходимой концентрации рабочего вещества в рабочей зоне саморазогревного лазера необходимо либо уменьшать толщину теплоизолятора контейнеров с CuBr, либо снижать $P_{потр}$.

Существенное влияние на температурный режим ГРТ оказывают добавки H_2, HBr, которые вдвое и больше увеличивают выходную мощность излучения и КПД лазера. Они также увеличивают активное сопротивление ГРТ [1] и улучшают ее согласование с генератором накачки. В нашем случае введение оптимальной добавки H_2, равной 46,7 Па, в ГРТ диаметром 2,6 см увеличило $T_{ст}$ на 95 °С. На рис. 1 показана зависимость мощности генерации и $T_{ст}$ от давления водорода. Видно, что $T_{ст}$ резко возрастает вблизи оптимума по добавке – 33,3...46,7 Па. Дальнейшее увеличение концентрации водорода приводит к снижению мощности генерации, а температура стенки остается на прежнем уровне. Аналогичное поведение мощности и $T_{ст}$ наблюдалось в присутствии HBr.

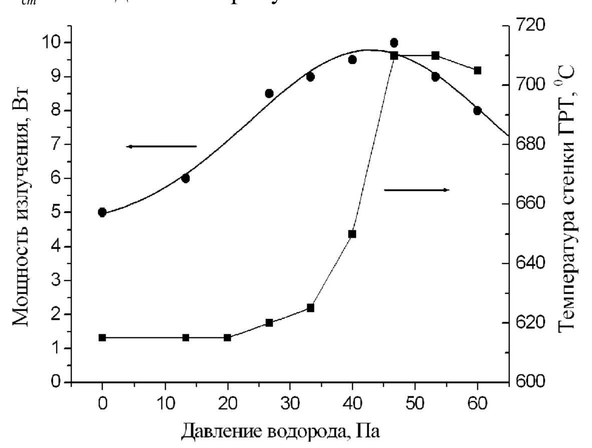


Рис. 1. *Зависимость мощности излучения, а также температуры стенки ГРТ диаметром 2,6 см от давления добавляемого водорода*

Кроме того, температурный режим активных элементов ЛПБМ менее 2 см с добавками H_2 или HBr имеет дополнительную особенность, которая, как нами предполагалось в [8], заключается в том, что идет дополнительная наработка CuBr за счет взаимодействия брома и бромводорода с металлической медью, оставшейся на стенке ГРТ. Рассмотрим подробнее эту особенность на примере ГРТ диаметром 1,6 см.

Постепенная подача оптимального количества HBr (которое устанавливалось заранее) в работающую с максимальной мощностью 0,5 Вт ГРТ сначала увеличивала мощность излучения, а затем понижала из-за переизбытка паров рабочего вещества. Об этом можно было судить визуально по выносу рабочего вещества в приэлектродные и торцевые зоны. Дальнейшая подача HBr приводила к срыву разряда, поэтому возникала необходимость снижения температуры нагревателей контейнеров с CuBr. Только после этого выходная мощность лазера достигала максимума – 2,5 Вт.

В ГРТ среднего диаметра это явление менее выражено, а в больших – более 4 см практически не заметно. В работе [8] мы предполагали, что это связано, во-первых, с увеличением длины диффузии молекул HBr к стенке ГРТ, во-вторых, с тем, что вводимая энергия в единицу объема больших ГРТ существенно меньше и, как следствие, диссоциация молекул HBr ниже, соответственно ниже и концентрация активного брома.

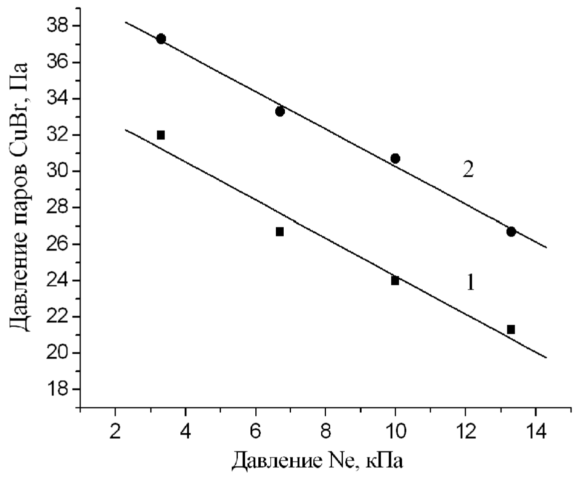


Рис. 2. *Давление рабочего вещества CuBr при различном давлении буферного газа Ne во время работы ГРТ диаметром 2,6 см: 1) без добавки HBr, 2) с добавкой HBr*

С целью подтверждения этих предположений проводилось измерение давления паров CuBr в ГРТ среднего диаметра 2,6 см с добавкой и без добавки HBr при различных давлениях буферного газа. Для устранения эффекта дополнительного нагрева канала ГРТ при введении HBr T_{cm} поддерживалась постоянной. На рис. 2 приведены зависимости давления CuBr от давления Ne для ЛПБМ с добавкой и без добавки HBr. Общая тенденция падения концентрации рабочего вещества с увеличением давления Ne скорее всего обусловлена стабилизацией разрядного напряжения на межэлектродном промежутке. Отчетливо видно, что в данной ГРТ бромводород увеличивает концентрацию CuBr в среднем на 6,7 Па. А это не так мало относительно оптимального значения добавки – 40...46 Па. Поэтому, используя активные примеси, необходимо иметь в виду не только увеличение температуры ГРТ, которая отражается на нагреве контейнеров и, следовательно, концентрации CuBr, но и учитывать дополнительное образование CuBr за счет реакций типа:

$$Cu(тв)+Br(газ) \rightarrow CuBr(газ);$$
$$Cu(тв)+HBr(газ) \rightarrow CuBr(газ)+H(газ).$$

Характерные особенности теплового режима CuBr-лазера проявляются также при повышенных ЧСИ. Они изучались с той же ГРТ, в которой измерялось изменение давления паров CuBr при ЧСИ 20...100 кГц. Отличительная черта этого режима заключается в том, что с увеличением ЧСИ для достижения максимальной мощности излучения приходилось снижать концентрацию рабочего вещества путем уменьшения толщины теплоизолятора контейнеров с CuBr. При этом T_{cm} на всех частотах поддерживалась на одном уровне. Результаты экспериментов отражены на рис. 3.

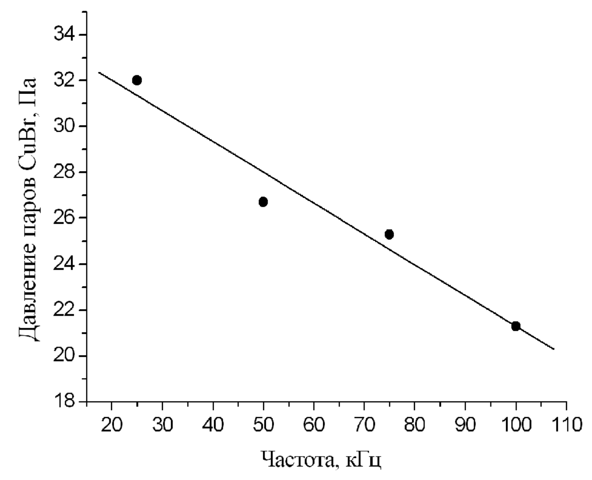


Рис. 3. *Поведение давления рабочего вещества CuBr в ГРТ диаметром 2,6 см при увеличении частоты следования импульсов*

Разница давления CuBr на частотах 20 и 100 кГц составляет 10,7 Па. По-видимому, это связано с тем, что с увеличением межимпульсного интервала не все атомы меди связываются в CuBr и происходит накопление свободных атомов меди.

Заключение

Исследован температурный режим CuBr-лазера в зависимости от условий накачки. Показано, что изменение рабочей емкости вдвое, также как и давления буферного газа с 3,3 до 13,3 кПа (при сохранении мощности, отбираемой от выпрямителя), улучшает согласование газоразрядной трубки диаметром 2,6...3,8 см с генератором накачки и увеличивает температуру стенки с 640 °С на 50...60 °С. Введение оптимальной добавки H_2 или HBr еще больше увеличивает температуру стенки – на 100 °С вследствие существенного увеличения сопротивления трубки. В газоразрядных трубках малого и среднего диаметра происходит дополнительное образование рабочего вещества за счет взаимодействия брома и бромводорода с атомами меди, осевшими на стенку трубки. В газоразрядной трубке диаметром 2,6 см с добавкой HBr давление CuBr увеличилось на 6,7 Па. На высоких частотах следования импульсов необходимо уменьшать концен-

трацию CuBr для получения максимальных выходных характеристик лазера по причине накопления свободных атомов меди. Для трубки диаметром 2,6 см, работающей при частоте следования импульсов 100 кГц, давление паров CuBr меньше на 10,7 Па, чем при типичных частотах следования (20 кГц).

Работа выполнена при поддержке Программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2006–2008 гг.)», грант Минобрнауки № 5450.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Little C.E. Metal Vapor Lasers. Physics, Engineering & Applications. – Chichester, UK: John Willey & Sons Ltd., 1998. – 620 p.
2. Батенин В.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Климовский И.И., Молодых Э.И. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. – М.: Научная книга, 1998. – 544 с.
3. Григорьянц А.Г., Казарян М.А., Лябин Н.А. Лазеры на парах меди. – М.: Физматлит, 2005. – 312 с.
4. Лазеры на парах металлов и их галогенидов / Под ред. Г.Г. Петраша // Труды ФИАН. – 1987. – Т. 181. – 193 с.
5. Astadjov D.N., Dimitrov K.D., Jones D.R., Kirkov V.K., Little C.E., Sabotinov N.V., Vuchkov N.K. Copper Bromide Laser of 120-W Average Output Power // IEEE J. Quantum Electronics. – 1997. – V. 33. – № 5. – P. 705–709.
6. Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С., Суханов В.Б., Федоров В.Ф. Лазер на парах бромида меди с высокой частотой следования импульсов // Квантовая электроника. – 2002. – Т. 32. – № 8. – С. 680–682.
7. Шиянов Д.В., Суханов В.Б., Евтушенко Г.С., Андриенко О.С. Экспериментальное исследование влияния добавок HBr на генерационные характеристики CuBr-лазера // Квантовая электроника. – 2004. – Т. 34. – № 7. – С. 625–629.
8. Андриенко А.С., Евтушенко Г.С., Жданеев О.В., Суханов В.Б., Шиянов Д.В. Влияние добавок HBr в активную среду лазеров на парах меди и галогенида меди // Оптика атмосферы и океана. – 2004. – Т. 17. – № 2–3. – С. 112–118.
9. Солдатов А.Н., Ермолаев А.П., Кирилов А.Е., Филонов А.Г., Филонова Н.А. Температурный режим работы лазера на бромиде меди // Оптика атмосферы и океана. – 2000. – Т. 13. – № 8. – С. 775–778.
10. Пат. 2243619 РФ. МПК^7 H01S 3/03. Активный элемент лазера на парах галогенида металла / Г.С. Евтушенко, В.Б. Суханов, Д.В. Шиянов, А.И. Чернышев. Заявлено 18.02.2003; Опубл. 27.12.2004, Бюл. № 36. – 5 с.: ил.

УДК 539.21(06)